



# 구리배선의 electromigration 신뢰성

박영준 | 한국과학기술연구원

## 1. 서 론

구리는 낮은 비저항 및 우수한 electromigration 신뢰성 등의 장점을 가지고 있어서 알루미늄을 대체할 차세대 배선 물질로 부각되고 있다. 1997년 IBM 및 Motorola에 의하여 구리배선의 성공적인 공정 결과가 발표되면서,<sup>1-3)</sup> 구리배선이 활발히 연구되고 있으며 일부 선진회사에서는 상용으로 판매되는 칩에 이미 구리 배선을 채택하고 있다. 국내에서도 이에 대한 연구가 시스템 IC 2010 사업 등 정부의 주도 하에 산학연에서 활발히 진행중이다<sup>4)</sup>. 구리배선의 우수성은 오래 전에 예상되었음에도 불구하고 상용화가 늦어진 이유는 구리 배선 공정의 높은 난이도 및 절연막을 쉽게 확산하여 소자를 파손하는 등 안정성에 문제가 있기 때문이다.<sup>5,6)</sup>

공정 난이도의 한 예로, 건식식각의 어려움을 들 수 있다. 배선의 미세한 모양을 형성하기 위하여 건식식각 공정이 필요한데 구리는 비교적 낮은 온도에서 건식식각을 수행하기가 어렵다. 이를 해결하기 위한 다양한 구리 패터닝 방법이 연구되어 왔으며<sup>7-13)</sup> 이에 더불어, 다른 해결 방법으로, 구리의 식각이 필요 없는 damascene 배선 공정법이 연구 개발되었다<sup>1-3)</sup>. Damascene 배선 공정은, 그림 1에 나타낸 것처럼, 먼저 (a) 절연막을 증착하고, (b) 절연막 표면에 건식식각 방법으로 배선 모양(trench 혹은 via)을 형성한 후, (c) 이 속에 구리를 채워 넣고, (d) 절연막 표면 위에

증착된 부분을 CMP(Chemical Mechanical Polishing) 방법으로 갈아내는 것이다. 이때 trench나 via의 크기가 작을 경우 void의 형성 없이 구리를 균일하게 채우는 것이 어렵다. Void 없는 구리 증착을 위하여 기존의 스퍼터링이나 CVD 방법을 대신하여 현재 전기도금법이 사용되고 있으며, 적당한 첨가제가 혼합된 도금액을 사용할 경우 void 없는 균일한 구리배선의 형성이 가능하다.<sup>3,14,15)</sup>

전해도금법으로 증착된 구리배선은, 알루미늄과는 달리 self-annealing이라는 현상이 발생한다.<sup>16-22)</sup> Self-annealing이란 상온에서 비정상 입자성장이 발생하는 것인데<sup>20,21)</sup> (연구자에 따라 재결정이라는 견해도 있음<sup>18,22)</sup>, 이의 발생기구를 이해하고 이를 바탕으로 배선의 미세구조를 최적화하는 것이 배선의 신뢰성을 확보

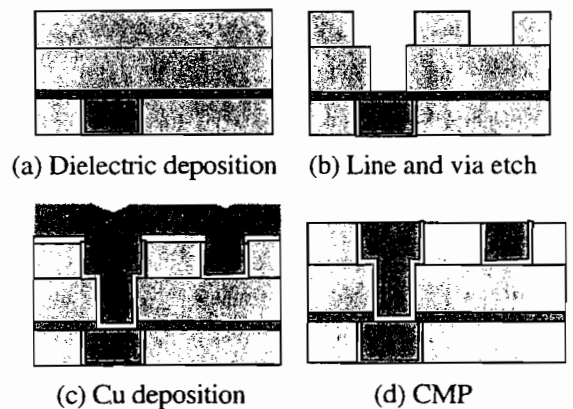


그림 1. Dual damascene 구리배선공정의 단계별 모식도

표 1. 보고된 Cu electromigration 실험 결과.

Deposition method	Line structure (Damascene)	Line width( $\mu\text{m}$ ) $\times$ height( $\mu\text{m}$ )	Activation energy, Q (eV)	Ref.
Electroplating	Ta/Cu	0.4 $\times$ 0.4	0.89	[27]
Electroplating	Ta/Cu	0.6 $\times$ 0.8	0.55-0.65	[28]
Electroplating	Ta/Cu	0.6 $\times$ 0.4	0.37	[29]
Electroplating	Ta/Cu	4 $\times$ 0.4	0.28	[29]
Electroplating	TaN/Cu	0.6 $\times$ 0.4	0.36	[29]
Electroplating	TaN/Cu	4 $\times$ 0.4	0.40	[29]
CVD	TiN/Cu	0.6 $\times$ 0.4	0.71	[29]
CVD	TiN/Cu	4 $\times$ 0.4	0.63	[29]
CVD	TiN/Cu/SiO <sub>2</sub>	3 $\times$ 0.35	0.67	[30]
CVD	TiN/Cu/SiO <sub>2</sub>	0.5 $\times$ 0.35	0.60	[30]
CVD+PVD	TiN/Cu/SiO <sub>2</sub>	0.85 $\times$ 0.35	1.02	[30]

하는데 필요하다. Self-annealing에 대한 대표적인 두 가지 의문점은 구리로 보면 매우 낮은 온도인 상온에서 어떻게 입자성장이 발생할 수 있는가 하는 것과 왜 전체 입자가 아닌 제한된 몇 입자만이 비정상적으로 성장하느냐 하는 것이다. 이러한 의문점에 대한 명확한 설명은 제시되고 있지 않지만 한 가능성으로 다음의 원인을 생각할 수 있다. 상온 입자성장이 가능한 이유는 구리도금막의 초기 입자크기가 첨가제에 의하여 수십 나노 정도의 매우 작은 크기를 가져서 상당한 성장구동력이 발생할 수 있기 때문에 상온에서의 성장도 가능할 수 있으며,<sup>20)</sup> 입자성장이 비정상적인 것은 첨가제에 의하여 입계의 특성이 singular해질 수 있는데 이러한 입계 특성의 변화가 비정상 입자성장의 원인을 제공할 수 있다는 것이다<sup>23)</sup>.

건식식각의 어려움과 더불어, 구리의 절연막을 통한 확산의 문제는 장시간의 안정적인 동작이 필수적인 반도체 회로에 있어서 치명적인 단점이다. 구리는 산화막 등을 통과하여 확산할 수 있는데,<sup>5-6)</sup> 특히 수분이 있는 상태에서 전압이 걸리게 되면 구리의 확산이 촉진되어 짧은 시간 안에 배선간의 단락이나 실리콘 소자의 파손 등 예기치 않은 신뢰성 문제를 일으킬 수 있

다. 따라서 구리의 확산을 억제할 수 있는 확산방지막을 구리배선의 둘레에 형성하여 구리의 확산을 억제하는 것이 장시간에 걸친 소자의 동작에 필수적이다.

이러한 특이점에도 불구하고 매우 안정적인 공정 및 물성이 확보된 알루미늄 배선을 대신하여 구리배선이 사용되는 것은, 위에서 언급하였듯이, 알루미늄으로는 앞으로 요구되는 반도체회로의 동작성능 및 신뢰성을 보장할 수 없기 때문이다. 구리배선을 사용한 경우 회로의 동작성능의 개선은 이미 보고되었고,<sup>24,25)</sup> 이론적인 신뢰성 향상도 예상되었다<sup>26)</sup>. 그러나 실제적으로 구리배선을 채택한 경우 신뢰성의 향상이 항상 보장되지 않는다는 것이 실험적으로 관찰되었다<sup>27-30)</sup>. 표 1에 구리배선의 electromigration 신뢰성에 대한 실험 보고들을 정리하였다. 배선의 신뢰성은 대표적으로 파손의 활성화 에너지(activation energy) Q를 비교함으로써 평가할 수 있는데, 일반적으로 Q가 클수록 신뢰성이 우수하다. 이러한 파손의 활성화 에너지는 electromigration이 발생하는 원자 확산의 활성화 에너지와 관련이 있으며, 원자 확산이 어려울수록 큰 값을 예상할 수 있다.

표 2에 구리 및 알루미늄의 각 확산기구에 대한 활성화 에너지를 정리하였다. 계면확산을 제외한 입계 및 벌크확산에 대하여 구리가 알루미늄보다 큰 활성화 에너지를 가진다. 따라서 입계 및 벌크확산으로 electromigration이 진행되는 경우 구리는 알루미늄에 비하여 고신뢰성을 나타낼 수 있다. 그러나 계면확산의 경우는 오히려 알루미늄의 경우가 구리보다 electromigration에 대하여 안정하다. 그 이유는 알루미늄은 표면에 매우 안정하고 치밀한 산화막을 형성하여 효과적으로 원자의 계면확산을 억제할 수 있는 반면,

표 2. 구리 및 알루미늄에서 각 확산기구에 대한 활성화 에너지.<sup>56-60)</sup>

	Al(Cu)	Cu
Interface	~1.0 eV	0.6~1.0 eV
Grain boundary	0.8~1.0 eV	0.9~1.2 eV
Bulk	1.4 eV	2.2 eV



구리는 상대적으로 취약한 구조의 계면이 형성되어 원자 확산이 쉽기 때문이다.<sup>27-30)</sup> 계면확산의 효과는 배선의 크기가 작아질수록 증가하게 된다. 따라서, 입계나 벌크확산이 중요한, 선풍이 큰 배선의 경우에는 구리배선의 신뢰성이 우수할 수 있지만 계면확산이 중요한 미세배선의 경우에는 구리가 알루미늄보다 electromigration 신뢰성이 나쁠 수 있다.

이러한 사실은 배선 재료를 알루미늄에서 구리로 바꾸는 자체가 신뢰성의 향상을 보장하지는 않는다는 것을 의미한다. 구리배선 성질을 정확히 이해하고 이를 바탕으로 공정을 최적화 하여야만 앞으로의 수요에 대응할 수 있는 고성능 배선의 형성이 가능한 것이다. 본 논문에서는 구리배선의 신뢰성 특성을 이해하기 위하여, 알루미늄과 다른 구리의 신뢰성 관련 물성 및 형성 공정의 몇 가지 특징을 기술하고자 한다. 먼저 일반 독자들의 이해를 돕기 위하여 electromigration에 대한 기초적인 사항을 다음절에서 간략히 기술하고, 그 후에 구리가 가지는 탄성이방성, 계면확산에 의한 bamboo 효과의 부재 가능성, 및 저유전을 절연막 채택에 따른 부가적인 문제점 등을 간략히 기술하고자 한다.

## 2. Electromigration 기초 이론<sup>31)</sup>

Electromigration은 배선에 흐르는 전류에 의하여 배선을 형성하고 있는 원자가 움직이는 현상을 의미한다.<sup>32)</sup> 전자에 비하여 원자는 수 천 배 이상 무겁기 때문에 전자의 충돌로 고체 속에서 정지하고 있는 원자가 움직이는 것은 매우 어렵다. 그러나 사실 고체 속의 원자들은 열에너지에 의하여 임의의 방향으로 움직이고 있으며, 전자의 충돌은 이러한 움직임에 방향성을 부여하게 되는 것이다. 따라서 한 방향으로 원자 이동량이 증가하게 되어 electromigration에 의한 원자 유속(flux)이 발생하게 된다. 배선을 따라서 원자의 유속이 발생하면 위치에 따라 유속의 양이 일정하지 않아서 유속의 divergence가 발생할 수 있다. 유속의

divergence는 배선의 어느 지점에 단위 시간당 유입된 원자와 유출된 원자의 차이를 의미한다. Divergence가 0이면 들어오고 나가는 원자의 양이 같아서, 그 지점의 본질적인 변화는 없다. 그러나 들어오는 원자가 나가는 원자에 비하여 많으면, 즉 divergence가 -이면, 잉여의 원자가 쌓이게 되어 hillock이 발생하게 되고, 그 반대의 경우에는 void가 발생하게 되어 배선은 파손된다.

유속의 divergence에 따른 배선의 변화를 다루는 관점에는 크게 응력과 공공(vacancy) 농도 변화의 두 가지가 있다.<sup>33-36)</sup> 원자의 확산을 공공기구로 가정하는 경우, 원자의 확산은 곧 반대 방향으로의 공공의 확산을 의미한다. 따라서 어느 위치에 원자유속의 divergence가 존재한다는 것은 곧 공공의 농도가 변화한다는 것을 의미한다. 고체 중 공공은 그 온도에 따라 평형 농도가 존재하는데, 이러한 농도의 변화는, 그 부분의 공공 상태가 supersaturated 혹은 undersaturated 상태가 되게 한다. 평형에서 벗어난 공공들은 그대로의 조성을 유지하든지 아니면, 고체 중 존재하는 입계나 전위 같은 공공의 sink/source 등에 의하여 평형 조성으로 되돌아가고, 그 결과 고체 중에 응력이 발생하게 된다. 이러한 divergence를 Shocks와 Lloyd<sup>33)</sup>는 평형에서 벗어난 공공의 농도 변화로 다룬 반면, Korhonen<sup>34)</sup>이나 Thompson<sup>35,36)</sup> 등은 배선에 발생하는 응력의 관점에서 다루었다. 이 두 관점은 단순히 sink/source의 공공 흡수 및 배출의 효율에 따라 달라지는 것이므로, 근본적인 차이는 없다. 현재 많은 연구에서 응력 관점이 채택되고 있는데, 그 이유는 사실 반도체 배선에는 입계를 비롯한 상당한 sink/source가 존재하여, 비평형의 공공이 빠르게 응력화 할 수 있고, 공정 중 발생하는 thermal stress와 electromigration에 의한 파손을 연계하여 다루기가 쉽기 때문이다.

응력 관점에서 electromigration에 의한 원자 유속, J는 식 (1)과 같이 표현된다<sup>34,36)</sup>.

$$J = \frac{CD}{kT} \left[ Z^* eE + \Omega \frac{d\sigma}{dx} \right] \quad (1)$$

여기서  $C$ 는 단위 부피당 원자수,  $D$ 는 원자의 확산 계수,  $k$ 는 Boltzmann 상수,  $T$ 는 온도,  $Z^*e$ 는 effective charge,  $E$ 는 전기장,  $\Omega$ 는 원자부피,  $\sigma$ 는 응력이다.  $D/kT$  항은 원자의 이동도를 나타내고, [ ] 속의 항은 이동에 대한 구동력을 나타내어서 이 두 항의 곱은 곧 원자의 속도이다. 이 속도에 단위 부피당의 원자수  $C$ 를 곱하면 원자유속이 된다. 원자이동의 구동력은 두 항으로 이루어져 있는데, 첫째 항인  $Z^*eE$ 는 원자의 충돌에 의한 순수 electromigration 구동력을 나타내고, 둘째 항  $\Omega(d\sigma/dx)$ 는 electromigration의 divergence에 의하여 발생한 응력에 의한 구동력을 나타낸다. 배선이 합금인 경우에는 여기에 화학적 구동력을 첨가해야 한다.

배선에서 유속의 divergence가 생겨 응력이 발생하는 지점에는 미세구조의 불균일점, 입계 삼중점, 선폭 변화점 등이 있으며, 이러한 원인이 없는 균일한 구조에서도 via end에서는 항상 응력이 발생한다. Via end에서는 여러 목적으로 W, Ta, TiN 등의 이중 물질이 Al이나 Cu 배선의 사이에 삽입되게 되는데, 이러한 물질을 통한 원자의 확산은 매우 어려워져서, 상당한 유속의 divergence가 항상 존재하기 때문이다. 배선의 임의의 위치에서 응력이 발생하게 되면, 응력 발생은 시간에 따라 배선 전체에 퍼지게 되고, 결국 순수 electromigration 구동력과 평형을 이루어, 전체 구동력이 0이 될 때까지 진행된다. 이때 배선이 견딜 수 있는 임계 응력이 존재하는데, 이 값에 도달하게 되면, 배선이 파손된다고 보는 것이 critical stress model이다.<sup>34-38)</sup>

배선의 파손시기를 알기 위해서는 시간에 따른 응력의 분포를 알아야 한다. 각 지점의 응력은 식 (2)<sup>34)</sup>와 같이, 단위 부피당 원자 수의 변화를 알면 구할 수 있다. 단위 부피당 원자 수는 식 (3)과 같은 continuity 식으로부터 구할 수 있다. 그 물리적 의미는 위에서 언급하였듯이, 어느 지점의 원자 유속의 divergence( $\Delta J$ )로 인해 비평형 공공이 곧 sink/source에 흡수 또는 방출 되는 과정을 통하여 단위 부피당 원자수를 변화시킨다

는 것이다.

$$\frac{d\sigma}{dt} = -B\Omega \frac{dC}{dt} \quad (2)$$

$$\frac{dC}{dt} - \frac{dC_v}{dt} + \Delta J = 0 \quad (3)$$

여기서  $B$ 는 effective modulus,  $C_v$ 는 단위부피당 공공의 수이다. 식 (3)에서  $dC_v/dt$ 는 다른 변화에 비하여 매우 작아서 무시할 수 있다.  $dC/dt$ 를 0으로 하고 식 (1), (2), (3)을 조합하면 식 (4)와 같은 응력 발생에 관한 미분 방정식을 얻을 수 있다<sup>34)</sup>.

$$\frac{d\sigma}{dt} = \frac{d}{dx} \left[ \frac{DB\Omega}{kT} \left( \frac{d\sigma}{dx} + \frac{Z^*eE}{\Omega} \right) \right] \quad (4)$$

식 (4)를 컴퓨터를 사용하여 주어진 경계 조건에서 풀면, 시간에 따른 응력의 분포를 얻을 수 있다.

Electromigration에 의한 배선에 응력이 발생하고, 임계 이상의 응력이 발생한 경우에 배선이 파손된다는 critical stress model을 증명한 매우 중요한 결과가 Blech에 의하여 보고되었다<sup>37)</sup>. Blech은 TiN 위에 부분적으로 여러 길이의 Al stripe을 형성한 후 이 Al stripe이 electromigration에 의하여 이동하는 현상을 관찰하였다. 그 결과, 어느 이상의 길이를 가지는 stripe만이 electromigration에 의하여 이동하였는데, 이러한 현상을 임계 응력의 개념으로 설명하였다. Electromigration에 의하여 발생하는 최대 응력은 식 (5)와 같이<sup>37)</sup> 전류밀도와 stripe의 길이에 비례한다. 따라서, 전류밀도가 정해진 경우에는 Al stripe의 항복 강도 이상을 발생시킬 수 있는 길이에서만 electromigration에 의한 stripe의 이동이 관찰된 것이다.

$$(jL)_{cr} = \frac{2\Omega \sigma_{max}}{Z^*e\rho} \quad (5)$$

여기서  $\sigma_{max}$ 는 배선 끝에 발생하는 최대 응력,  $j$ 는 전류밀도,  $\rho$ 는 배선의 비저항이다. 이러한 결과로부터 배선의 임계 강도를 알면, 배선이 절대로 파손되지 않는,



소위 immortal 조건을 얻을 수 있다. 배선의 임계강도는 배선의 종류 및 공정조건에 따라 달라지는데 예로  $(jL)_{cr}=1000A/cm$ 인 경우  $1 \times 10^5 A/cm^2$ 의 전류가 흐를 때  $100\mu m$  이하의 배선은 electromigration에 의하여 파손되지 않는다.<sup>37)</sup> 이와 같이 주어진 전류밀도에서 electromigration에 의한 파손이 진행되는 임계 길이가 존재하는데 이를 Blech 길이라고 부른다.

일반적으로 electromigration에 의한 배선의 파손은 log-normal 분포를 가지는 것으로 가정된다. 이러한 분포에 특별한 물리적 의미가 있는 것은 아니고, electromigration의 초기 연구자들이 이 분포를 이용하여 배선의 파손을 나타낸 이후로, 대부분의 연구에서 이 분포가 가정되었다. Log-normal 분포에서 파손의 확률함수는 식 (6)으로 나타내어진다.

$$f(t) = \frac{1}{\sigma_f \sqrt{2\pi}} \exp \left[ - \left( \frac{1}{\sqrt{2} \sigma_f} \ln \frac{t}{t_{50}} \right)^2 \right] \quad (6)$$

여기서,  $\sigma_f$ 는 파손시간의 standard deviation,  $t$ 는 파손시간,  $t_{50}$ 는 median time to failure이다.  $t_{50}$ 는 배선의 평균적인 수명을 나타내는 것으로 가장 중요한 의미를 가진다. 그런데 이와 더불어  $\sigma_f$ 도 매우 중요하다.  $\sigma_f$ 는 log-normal 분포에서 직선의 기울기로, 이 값이 클수록 파손이 넓은 시간 범위에 걸쳐 발생함을 나타낸다. 따라서  $t_{50}$ 가 크더라도,  $\sigma_f$ 가 크면, 첫째 파손이 빨리 발생하게 되어서 좋은 배선이라고 할 수 없다.

배선의 사용조건에서의 예상 수명은 Black의 식으로 계산할 수 있다.<sup>39)</sup> 실제 사용조건에서 배선의 수명을 측정하는 것은 너무 긴 시간이 소요되어 바람직하지 못하다. 그 대신 사용조건보다 큰 전류밀도 및 온도의 가속 조건에서 배선을 시험하여  $t_{50}$ 를 빠른 시간 안에 구한 후, Black의 식을 이용하여 사용조건에서의 수명을 예측하는 것이다. 이때  $\sigma_f$ 와 파손기구는 온도 및 전류밀도에 따라 달라지지 않는다고 가정한다. Black의 식은 식 (7)에 나타내었다.

$$t_{50} = A j^{-n} \exp \left( \frac{Q}{kT} \right) \quad (7)$$

여기서,  $A$ 는 상수,  $n$ 은  $t_{50}$ 의 전류밀도 의존성,  $Q$ 는  $t_{50}$ 의 온도에 대한 의존성을 나타낸다.  $n$ 과  $Q$ 는 클수록 가속조건보다는 사용조건에 긴 수명을 가지게 된다.  $Q$ 는 일반적으로 electromigration이 발생하는 지배적인 확산기구의 활성화 에너지 값을 나타내게 되는데, Al 배선의 경우 입계확산을 하는 큰 폭의 다결정 배선의 경우 0.4-0.8eV의 값을 나타내고 bamboo 이하의 미세선폭의 경우에는 약 1.0eV로 증가하는 경향이 보고되었다.<sup>40)</sup> 구리의 경우 표 1에 나타내었듯이 입계의 확산 보다 작은 활성화 에너지 값들이 보고되고 있다.  $n$ 의 값은 파손이 발생하는 기구와 관련이 있는데, 1의 경우에는 void growth 기구를 2의 경우에는 void nucleation 기구를 나타낸다. 실험적으로는 폭이 넓은 다결정 배선의 경우에는 2의 값이 일반적으로 보고되었으나, 미세배선화 하면서 1-2 사이의 값을 나타내고 있다.<sup>41)</sup> 배선의 폭에 따라  $n$ 이나  $Q$  값이 복합적으로 변화하기 때문에 미세 배선에서는 사용조건에서의 수명을 예측하기가 어려워진다. 즉 Black의 식의 적용이 항상 보장되지 않는다. 가속조건에서의 수명도 배선의 폭이 감소하면서 복합적인 변화를 하게 된다. 다음절에서 언급한 대로 배선 폭이 감소함에 따라 미세구조는 다결정, near-bamboo, bamboo 구조로 변화하게 되고, 확산은 배선 내부보다는 계면확산이 중요하게 되어 파손기구가 일정하게 유지된다고 가정할 수 없다.

### 3. Electromigration 신뢰성에 관련된 구리배선의 물성

#### 3-1. 구리배선의 탄성이방성에 의한 응력 발생 및 분포

박막의 집합조직은 각 입자가 가지는 표면에너지 및 탄성에너지 등이 최소가 되도록 결정된다. 표면에너지

및 탄성에너지의 중요성은 막의 두께에 따라 달라지는데 막이 얇은 경우에는 표면에너지가 중요하고, 두꺼워질수록 탄성에너지가 중요하게 된다. 따라서 매우 얇은 막은 대부분 표면 에너지를 최소화하기 위한 집합 조직을 가지게 되는데, FCC 구조의 경우 (111) 집합 조직이 표면 에너지를 최소화한다. 막의 두께가 두꺼워져서 탄성에너지가 중요하게 되면, 방향에 따른 탄성 에너지 이방성에 의하여 집합조직이 변화할 수도 있다. 표 3에 구리와 알루미늄의 몇 가지 결정면에 대한 탄성계수를 나타내었는데, 알루미늄보다 구리의 경우가 탄성이방성이 매우 큼을 알 수 있다. 알루미늄과 같이 입자 방향에 따라 탄성이방성이 크지 않은 경우에는, 막이 두꺼워서 탄성에너지가 중요하게 되어도, 특정 입자의 성장 구동력을 제공할 수 없어서, 탄성에너지에 의한 집합조직의 변화를 관찰하기가 어렵다. 반면에 구리와 같이 탄성 이방성이 큰 경우에는 탄성 에너지를 줄일 수 있는 입자의 성장이 촉진되게 된다. 구리의 경우 (200) 방향의 입자가 이에 해당된다. 따라서 구리 막의 두께를 증가시키면서 고온에서 유지할 경우 (111) 집합조직에서 (200) 집합조직으로의 전이가 발생할 수 있다.<sup>42)</sup> 막의 두께가 더욱 커지는 경우 탄성에너지는 입자의 항복에 의하여 해소되게 되는데, 항복응력은 입자의 방향에 따라 달라서, (220) 입자의 경우 가장 작은 응력에서 항복이 발생하게 된다<sup>43)</sup>. 이 경우 (220) 집합조직이 관찰될 수 있다.

구리의 탄성 이방성은 같은 두께의 막을 고온에서 열처리 할 경우에도 시간에 따라 성장하는 입자의 변화를 일으킬 수 있다. 초기에 강한 (111) 집합 조직을 가지는 경우 고온에서 열처리를 하면 입계를 줄이기 위하여 (111) 입자의 성장이 발생한다. 입자가 성장함에

따라 인장응력을 해소할 수 있는 지역인 입계의 면적이 줄어들면서 막에는 인장응력이 발생하게 된다. 이러한 인장응력이 어느 이상의 값을 가지게 되면, 탄성 에너지가 중요하게 되고 이를 줄이기 위한 새로운 방식의 입자가 성장할 수 있다. 탄성 에너지를 줄이는 방법에는 (200) 입자가 성장하거나, (111) 입자에 twin이 발생하는 것이다. 이러한 두 가능성 중 어느 방법으로 탄성 에너지를 감소시킬 것인가는 막의 초기 조건에 따라 달라질 수 있다. 한 예로 초기의 (111) 집합조직이 매우 강한 경우 (200) 입자가 존재하기 어려워 twinning에 의한 탄성 에너지 감소가 지배적일 수 있다. 반면에 (200) 입자가 존재하는 경우 이의 성장에 의하여 막의 탄성 에너지를 낮출 수 있다.

(111) 집합조직의 막과 (200) 집합조직의 막을 비교할 경우, 온도 변화 등에 의하여 같은 크기의 열응력이 발생할 경우 (200) 막의 경우가 (111) 막에 비하여 작은 탄성 변형에너지가 발생할 것이므로, stress migration에 의한 voiding이 억제될 수 있을 것이다. 이것은 알루미늄의 경우 (111) 막이 electromigration 신뢰성 등에 우수한 성질을 나타낸 것과는 다른 결과로, 구리 배선의 경우 (111) 집합조직이 좋은 신뢰성을 나타내지 않을 수도 있다.

Twinning은 구리배선의 신뢰성에 큰 영향을 미칠 수 있다<sup>44)</sup>. (111) 입자에서 twinning이 발생하면 이 면은 (111)이 아닌 다른 면을 가지게 되고, 구리는 탄성 이방성이 매우 크기 때문에, 방향에 따라 상당한 크기의 응력 기울기가 발생할 수 있다. 이러한 응력은 twin 경계나 모서리 등에 집중될 수 있어서, 온도의 변화 중에 발생하여 stress migration에 의한 공공 형성 등이 진행될 수 있다. 또한 미소 방위의 차이에 의하여 발생하는 응력은 구리 막 전체가 가지는 평균 응력과는 달라서 평균 응력의 제어만으로는 구리 배선에서의 stress migration에 의한 파손을 제어할 수 없다. 또한 twin 면은 원자의 확산을 촉진하여 공공의 형성을 촉진할 수 있다.

표 3. 구리와 알루미늄에서 각 결정면의 탄성계수.

	(111)	(200)	(220)
Cu(GPa)	261	115	233
Al(GPa)	189	179	139



열응력에 의한 초기 응력 분포가 공공을 형성할 만큼 충분히 크지 않아도, 배선에 전류가 흐르면서 발생하는 electromigration 응력에 의하여 배선의 파손이 진행된다. 특히 응력 분포들은 서로 반응하면서, 배선의 파손을 촉진하거나 억제할 수 있는데, 알루미늄과는 달리 구리의 경우 미소한 입자의 방위차이가 응력의 기울기를 유발할 수 있어서, 복잡한 형태의 파손을 보일 수 있다. 또한 twinning은 원자의 표면확산에도 영향을 미친다. 위에서 언급하였듯이 (111) 면에서 일차 twinning 이 발생하면 그 결정면은 (115) 면이 된다. 그런데 Cu(111) 면은 확산은 등방적이어서 면의 in-plane 방향에 대하여 일정한 확산계수를 가지는 반면, twinning 등으로 형성되는 (115) 면은 diffusion channel이 <110>으로 이 channel의 방향에 따라 표면 확산이 다를 수 있다<sup>45)</sup>. 따라서 같은 (115) 입자가 표면에서 접하여 있어도 이 경계에 electromigration에 의한 local stress가 발생할 수 있다.

또한, 구리막에서의 탄성성질 이방성은 열응력 등이 상당히 커서 부분적인 항복이 발생하는 경우 배선 내에 분포하는 응력의 분포를 더욱 복잡하게 만들 수 있다. 막 내부에서 서로 다른 방향의 입자가 존재하는 경우 각 입자에 걸리는 응력이 다르고, 또한 각 입자의 항복 응력이 달라서, 부분적인 항복에 의하여 soft한 한 입자 안에서만 항복이 발생할 수도 있다. 이러한 경우 전체 막의 탄성 성질은 soft한 입자의 분율에 따라 달라지게 된다.

구리가 알루미늄과 다른 물성을 가지기 때문에 발생하는 차이에 더불어, 구리 배선의 형성 공정이 알루미늄과는 다르기 때문에 발생하는 차이도 있다. 알루미늄은 일반적으로 스퍼터링 방법으로 막을 형성한 후 이를 배선모양으로 식각하고, 약 400°C의 고온에서 절연막 등을 덮은 후 사용하게 된다. 따라서 상온에서의 알루미늄 배선에는 열응력에 의하여 상당한 크기의 인장 응력이 발생한다.<sup>46)</sup> 반면에 구리는 상온에서 전기도금의 방법으로 증착하게 되고, 소위 self-annealing이라는

상온에서의 입자성장을 하면서 상당한 크기의 응력을 스스로 해소한다.<sup>20)</sup> 실제 공정에서는 이러한 self-annealing을 빠른 시간 안에 진행시켜서 미세구조를 안정화시키기 위하여, 온도를 높여서 짧은 시간 동안 열처리를 하기도 하는데 이러한 온도 및 시간은 알루미늄 배선이 겪는 것에 비하여 작은 양이다. 그리고 알루미늄과는 달리 구리는 trench 속에 갇혀 있는 상태로 증착되고 열을 받게 되어, 응력의 변화 양상도 매우 다르게 된다.<sup>46-48)</sup> 이러한 이유에 의하여 구리배선의 응력 상태는 알루미늄의 것과는 상당히 다를 수 있다. 이러한 초기 응력 분포에 더하여 electromigration에 의한 응력이 발생하기 때문에 이에 대한 정확한 분석 및 이해는 구리 배선의 신뢰성을 확보하는데 필요하다.

### 3-2. 구리배선의 미세구조

#### 가. 구리배선의 side wall texture 효과

구리배선의 미세구조는 알루미늄의 미세구조와 다르다. 알루미늄 배선은 패턴이 형성되기 전의 연속막의 형태에서 미세구조가 형성되는 반면, 구리배선은 trench나 via 등의 패턴이 먼저 절연막에 형성되고 그 속에 구리가 증착된 후 미세구조가 발달하기 때문이다. 패턴이 없는 연속막의 경우에는 모든 입자가 기판으로부터 윗 방향으로 형성되면서 미세구조가 형성되기 때문에 입자의 크기 및 집합조직이 형성될 패턴의 크기에 무관하고 막의 두께 및 열처리 조건 등에 따라 결정된다. 그러나, 구리의 경우와 같이 미리 형성된 패턴 속에서 미세구조가 발달하게 되면, 패턴의 크기 및 모양에 따라 미세구조가 달라지게 된다. 즉 핵생성이 굴곡이 있는 trench 내벽을 따라 발생한 후 trench의 폭이나 깊이에 제한을 받으며 성장하기 때문에, 기판과 일정한 관계를 가지고 성장하는 경우라도 복잡한 집합조직이 관찰될 수 있다.

그 중 한 효과가 side wall texture 효과이다<sup>22,49)</sup>. 패턴이 미리 형성된 경우에는 막의 증착시 핵생성이 패턴의 바닥에서도 발생하지만, 옆면에서도 발생할 수 있

어서 기판에 대하여 일정한 방향관계를 가지는 집합조직이 발생한다 하여도, 밀면으로부터의 집합조직과 옆면으로부터의 조직 등 서로 다른 집합조직의 혼재를 관찰하게 된다. 이러한 side wall texture의 효과는 배선의 폭이 작아지고 깊이가 깊어질수록 옆면에서 핵생성한 입자의 분율이 커져서 강하게 된다<sup>49)</sup>. 즉 어느 입계 이상의 종횡비를 가지는 구리배선의 경우 side wall texture가 항상 존재하게 되고 이러한 이중 texture는 배선의 electromigration 신뢰성에 나쁜 영향을 끼칠 수 있다. 특히 위에서 언급한 구리의 매우 큰 탄성이방성에 의하여 이중 집합조직이 발달할 경우 응력 분포가 복잡할 수 있어서 신뢰성의 평가가 어려워 질 수 있다.

#### 나. 구리배선에서의 bamboo 효과

배선의 electromigration 신뢰성은 배선의 미세구조에 따라 달라진다. 입자의 크기와 배선의 폭에 따라 결정되는 배선의 미세구조에는 (a) 다결정(polycrystalline) 배선, (b) near bamboo 배선, (c) bamboo 배선 등 크게 세 가지로 분류될 수 있다.(그림 2) 배선의 폭이 입자의 크기보다 충분히 크게 되면 배선의 폭 방향으로 하나 이상의 입자가 존재하는 다결정(polycrystalline) 배선이 되고, 배선의 폭이 입자의 크기에 비하여 충분히 작게 되면, 배선의 폭이 하나의 입자로 채워져서 배선의 길이 방향으로 입계가 존재하

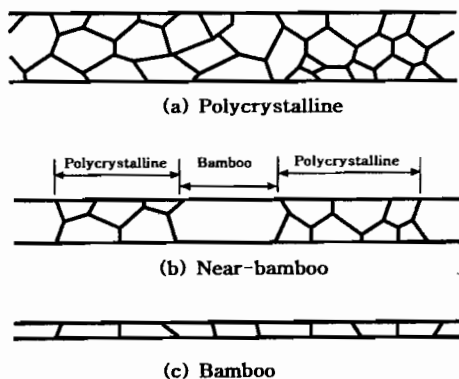


그림 2. 선폭과 입자 크기 비에 따른 배선의 미세구조

지 않고 폭 방향으로만 대나무의 마디 모양의 입계가 존재하는 bamboo 구조를 가지게 된다. 이 두 구조의 사이에 near bamboo 구조가 존재하는데, 배선의 폭과 입자의 크기가 비슷해서 배선의 위치에 따라, 그림 2와 같이, 다결정 배선과 bamboo 배선이 혼재하는 경우이다.

알루미늄 배선의 경우 near-bamboo 미세구조를 가지는 경우가 가장 나쁜 신뢰성을 나타내는 것으로 보고되었다.<sup>50)</sup> 그 이유는 다결정 배선과 bamboo 배선이 만나는 지역에서 확산의 기구가 입계 확산에서 bulk 확산으로 바뀌면서 electromigration에 의한 원자 이동의 divergence가 발생하기 때문이다. 만일 이보다 배선 폭이 더욱 감소하여 다결정 구간이 없어지게 되면, 모든 배선 구간에서 electromigration은 느린 bulk 확산으로 발생하기 때문에 배선의 신뢰성은 향상되는 것으로 보고되었다.<sup>50)</sup> (그림 3) 이것이 bamboo effect이다. 이 효과는 회로의 집적도가 계속 증가면서 미세한 배선을 사용하는 경우, bamboo 구조로의 미세구조의 변화에 의하여 배선의 신뢰성이 향상될 수 있다는 것을 의미한다.

그러나 이러한 현상이 구리배선에서도 발생할 것인가는 아직 명확하지 않다. 그 이유는 bamboo 효과가 발생하기 위해서는, 입계가 존재하는 경우, 대부분의

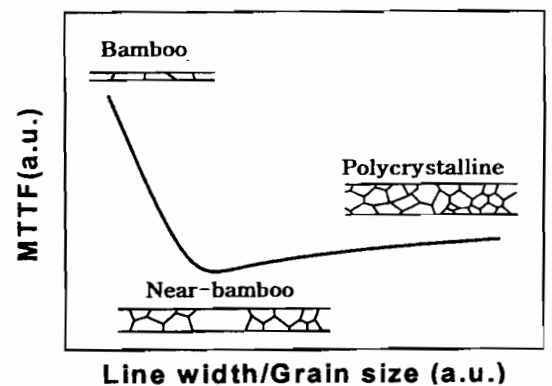


그림 3. 배선 선폭에 따른 electromigration MTTF(Median Time To Failure).<sup>50)</sup>





원자 확산이 입계로 진행되어야 하는데, 구리의 경우에는 입계의 확산과 더불어, 절연막과 구리배선 사이의 계면이 알루미늄에 비하여 상당히 취약하여, 계면 확산이 상당량 발생하기 때문이다<sup>27-30)</sup>. 따라서 입계가 없어진 bamboo 구조가 되더라도, 확산이 효과적으로 억제되지 못하고 계면을 따라 계속 발생하게 되는데, 이러한 계면확산은 배선의 폭이 작아질수록 중요하게 되어, 배선의 폭이 작아질 때 관찰되는 bamboo 효과가 나타나지 않을 수 있다. 따라서 구리배선의 신뢰성 향상에 있어서 계면의 확산을 억제하는 것이 매우 중요하다. 계면의 확산을 억제하지 못하는 경우 어느 크기 이하의 배선 폭에서는 알루미늄 배선보다 오히려 신뢰성이 나쁠 것으로 판단된다.

구리배선에서 bamboo 효과가 관찰되기 어려운 또 하나의 이유로는 damascene 배선의 특수성을 들 수 있다. 즉 알루미늄의 연속막과는 달리 trench 속에서 미세구조가 발달하여야 하기 때문에 선 폭이 작을수록 입자의 크기도 제한되어서, bamboo 구조로의 발달이 근본적으로 매우 어렵다. 매우 얇은 구리 배선에서 side wall texture 가 남아 있는 것도 이러한 원인에 기인한다. Mullins<sup>51)</sup>는 박막의 경우 입자가 성장할 수 있는 최대 크기는 막의 두께에 따라 제한된다고 제안하였다. 알루미늄과는 달리 구리배선의 경우 배선의 폭이 막의 두께로 작용할 수 있기 때문에, 매우 폭이 작은 구리배선의 경우 깊이 방향으로 여러 입자가 안정적으로 존재할 수 있고, 이로 인하여 side wall texture가 존재할 수 있어서 bamboo 구조를 가지는 것이 어렵다. 즉 충분히 작은 선폭의 구리배선이라 하더라도 bamboo 구조가 아닐 확률이 크기 때문에 electromigration 신뢰성에 대한 개선 효과가 나타나지 않을 수 있다.

### 3-3. 저 유전을 절연막이 구리배선의 electromigration 신뢰성에 미치는 영향

고성능 회로의 실현을 위하여 구리배선의 채택과 더불어, 절연막은 실리콘 산화막에서 저유전을 절연막으

로 대체되고 있다.<sup>52-53)</sup> 저유전을 절연막으로 바뀌게 되면, 회로의 속도 향상을 기대할 수 있지만, 저유전을 절연막의 작은 열전도성 및 취약한 기계적 성질에 의하여 배선의 신뢰성은 오히려 저하될 수 있다.

표 4에 몇 가지 저유전을 절연막의 열전도성 및 기계적 성질을 나타내었다. 저유전을 절연막은 실리콘 산화막에 비하여 작은 열전도성을 가지고 있어서 회로에 고전류가 흐르는 경우 발생하는 joule heating의 영향이 심각할 수 있다. 즉 배선에 같은 전류밀도가 흐르는 경우, 저유전을 절연막은 실리콘 산화막에 비하여 열전달이 어렵기 때문에 큰 joule heating이 발생하여 배선의 온도는 상승하게 된다. Joule heating이 발생하여 배선의 온도가 상승하는 경우 배선의 신뢰성은 두 가지 관점에서 영향을 받게 된다. 첫째는 전체적인 온도 상승에 의하여 원자의 확산이 촉진되게 되어 electromigration에 의한 배선의 파손이 가속되는 것과, 둘째는 불균일한 온도 분포에 의하여 thermal transport가 부가적으로 발생하여 배선의 파손이 촉진되는 것이다. Joule heating은 전류밀도가 클수록 크게 된다. 따라서 배선 폭이 일정하지 않은 경우, 전류밀도가 변화하게 되면 불균일한 joule heating이 발생하게 되어, 온도기울기가 발생한다.

배선에 발생하는 열변형(thermal strain)은 배선과 기판의 열팽창계수의 차이에 의하여 결정되기 때문에 배

표 4. Low-k 절연막 물질들의 Young's Modulus와 열전달계수<sup>74)</sup>

Materials	Young's Modulus(GPa)	Materials	열전달계수 (W/m°C)
SiO <sub>2</sub>	113	SiO <sub>2</sub>	1.26
BCB	4.9	Xerogel <sup>a</sup> 48% porous	0.250
SLK	2.3	63%	0.157
Parylene-N	2.9	70%	0.108
Parylene-F	4.9	77%	0.065
BPDA-PDA	8.3	BPDA-PDA	0.209
PTEE	0.5		

선 위를 덮는 절연막이 실리콘 산화막에서 저유전율 절연막으로 바뀌어도 열 변형은 크게 영향을 받지 않는다. 그러나 구리/저유전율 절연막의 경우 공정온도 및 배선구조가 알루미늄 공정과는 달라서 열변형은 다른 값을 가지게 된다. 즉 물질의 변화에 의한 효과보다 damascene 구조 및 증착온도 등의 변화에 의하여 사용 조건에서 구리배선은 알루미늄 배선과는 다른 열변형량을 가질 수 있다. 배선에 열변형 및 electromigration에 의한 변형이 발생하면, 응력이 발생하게 되는데, 응력 값은 그 구조 및 물질에 따라 결정되는 effective elastic modulus에 따라 결정된다<sup>34)</sup>. (물론 배선 주위가 절연막으로 둘러싸인 연속막의 경우에는 배선 자체의 탄성계수에 따라 응력이 결정되겠지만, 주위의 절연막 등에 의하여 제한 될 경우에는 effective elastic modulus를 계산하여야 한다.) 알루미늄 배선이 실리콘 산화막에 둘러싸인 경우에는 Eshelby<sup>54)</sup>의 이론의 바탕으로 effective elastic modulus가 약 50GPa의 값이 계산되었다.<sup>34)</sup> 이러한 effective elastic modulus는 응력의 발생에 직접적인 관계가 있어서 electromigration 신뢰성에 큰 영향을 미친다. Korhonen<sup>34)</sup>의 모델에 따르면, effective elastic modulus를 B라고 하면, electromigration에 의하여 발생하는 stress는  $\sqrt{B}$ 에 비례하고, 평형상태에서의 포화 저항 증가는 B에 반비례한다. 즉 B가 작을수록 큰 포화저항증가가 발생하여 소위 Blech length가 변화할 수 있다. 그러나 핵생성된 void의 성장속도는 B에 무관하다.

만일 배선의 주위를 실리콘 산화막에 비하여 soft한 저유전율 절연막으로 대체하는 경우 배선이 느리게 되는 B는 변화할 수 있다. Stefan<sup>55)</sup> 등이 절연막의 Young's modulus에 따라 B를 계산하였는데, liner의 존재 유무에 따라 다른 결과를 얻었다. TaN, Ti, TiN, Ta 같은 liner가 없는 경우에는 절연막의 Young's modulus가 변화함에 따라 B가 크게 변화하였으나, liner가 있는 경우에는 큰 변화가 없었다. 이는 liner가 상당히 단단하기 때문에 이에 의하여 절연막의 변화가

B에 큰 영향을 주지 못하는 것으로 판단하였다. 구리 배선에서 liner는 현재 구리의 확산 등을 방지할 목적으로 필수적으로 존재하여야 한다. 위의 결과는 이 경우 무른 절연막에 의하여 상당한 응력이 liner에 집중될 수 있음을 의미한다. 즉 배선의 파손보다는 liner의 파손이 쉽게 진행될 수 있음을 나타낸다. 또한 배선의 저항을 낮게 유지하기 위하여 liner의 두께를 최대한 얇게 하려는 것이 앞으로의 경향이다. 이 경우 liner의 효과가 작아지면서, 배선은 절연막의 변화에 따라 상당히 다른 B를 느끼게 된다. 따라서 절연막의 기계적 성질이 electromigration 신뢰성에 큰 영향을 미칠 수 있다. 특히 구리배선 자체의 파손에 비하여 liner 및 절연막 부분에서의 파손이 중요해질 것으로 판단된다.

#### 4. 결 론

구리배선은 알루미늄을 대체하여 차세대 고성능 회로의 요구 성능을 제공할 수 있는 기본 물성을 가지고 있음은 분명하다. 그러나 최근의 보고들은 단순히 알루미늄을 구리로 대체하는 것이 고신뢰성의 배선을 형성하지는 못한다는 것을 보여준다. 구리는 알루미늄과 탄성적으로 매우 다를 뿐더러, 절연막과의 계면성질도 매우 나쁘기 때문이다. 또한 구리와 더불어 절연막이 저유전율 절연막으로 대체되면서 작동조건이 더욱 열악하게 된다. 따라서 구리의 물성을 정확히 이해하고, 알루미늄과는 다른 공정한 damascene 공정을 최적화하는 것이 고신뢰성의 구리배선을 형성하는데 필수적이다. 특히, liner 등의 필요성으로, 구리배선의 유효 저항이 알루미늄과 비슷하여 지고, bamboo 효과도 불분명한 초미세 배선에서는 신뢰성 확보를 위한 배선구조 및 공정의 설계가 매우 중요할 것으로 판단된다.

#### 참고문헌

1. D. Edelstein, et al., : IEEE 1997, International Electron Devices Meeting Technical Digest, p. 773.



2. L. Zucherman : "IBM to Make Smaller and Faster Chips - Second Breakthrough in a Week Has Wide Uses," The New York Times, D1. Monday, September 22, 1997.
3. S. Venkatesan et al. : "A High Performance 1.8V, 0.20 $\mu$ m CMOS Technology with Copper Metallization," Technical Digest, IEEE International Electron Devices Meeting, 1997, p. 769.
4. 주상돈 : "시스템IC 개발사업 1차 연도 업체 선정 평균 경쟁률 3대1", 전자신문, 11월 21일, 1998.
5. T. Nitta et al. : J. Electrochem. Soc., **139**, 922 (1992).
6. J. O. Olowolafe et al. : Appl. Phys. Lett., **58**, 469 (1991).
7. J. Li et al. : Mater. Res. Bull., **XIX**, 15 (1994).
8. J. M. E. Harper et al., : Mater. Res. Bull., **XIX** 23 (1994).
9. A. B. Gelatos et al. : Mater. Res. Bull., **XIX**, 49 (1994).
10. N. Misawa et al. : Mater. Res. Bull., **XIX** 63 (1994).
11. S. Venkatesan et al. : 1997 International Electron Device Meeting Technology Digest (IEEE, Piscataway, 1997), p. 769.
12. Y. Morand et al. : 1997 Symposium on VLSI Technology Digest Technology Papers (Business Center for Academic Societies Japan, Tokyo, 1997), p. 31.
13. K. Ueno et al. : 1995 Symposium on the VLSI Technology Digest Technology Papers (Business Center for Academic Societies Japan, Tokyo, 1995), p. 27.
14. P. C. Andricacos et al. : IBM J. Res. Ev., **42**, 567 (1998).
15. R. L. Jackson et al. : Solid State Technol., **41**, 47 (1998).
16. C. Cabral et al. : Proc. Adv. Metall. Conf., **14**, 81 (1999).
17. T. Ritzdorf et al. : Proceedings of the International Interconnect Technology Conference (IEEE, New York, 1998), p. 166.
18. C. Lingk et al. : J. Appl. Phys., **84**, 5547 (1998).
19. Q. -T. Jiang et al. : Proc. Adv. Metall. Conf., Colorado Springs (1998).
20. J. M. E. Harper et al. : J. Appl. Phys., **86**, 2516 (1999).
21. S. P. Hau-Riege et al. : Appl. Phys. Lett., **76**, 309 (2000).
22. C. Lingk et al. : Appl. Phys. Lett., **74**, 683 (1999).
23. J. -M. Paik et al. : Mater. Res. Soc. Symp. Spring meeting, **L9.9** (2001).
24. Pentium 4 by IBM (2000).
25. Thunderbird by AMD (2000).
26. S. P. Murarka et al. : Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences, 20(2), 87 (1995).
27. C. S. Ryu et al. : Symp. On VLSI Technology Digest of Tech. Papers, (1998).
28. E. T. Ogawa et al. : Mater. Res. Soc. Symp. Proc., **612**, D2.3.1 (2000).
29. T. Berger et al. : Mater. Res. Soc. Symp. Proc., **612**, D2.4.1 (2000).
30. L. Arnaud et al. : 37<sup>th</sup> Annual International Reliability Physics Symposium, San Diego, (1999).
31. Y. -J. Park, and Y. -C. Joo : Proc. of the 13th Conference on Mechanical Behaviors of Materials Kihung, Korea, 83 (1999).
32. H. B. Huntington et al. : J. Phys. Chem. Solids, **20**, 76 (1961).
33. M. Shatzke and J. R. Lloyd : J. Appl. Phys., **59**, 3890 (1986).
34. M. A. Korhonen et al. : J. Appl. Phys., **73**, 3790 (1993).
35. J. J. Clement et al. : J. Appl. Phys., **78**, 900 (1995).
36. Y. -J. Park et al. : J. Appl. Phys., **82**, 4277 (1997).
37. I. A. Blech : J. Appl. Phys., **47**, 1203 (1976).
38. B. D. Knowlton et al. : J. Appl. Phys., **81**, 6073 (1997).
39. J. R. Black : IEEE Trans. Electron Devices, ED-**16**, 338 (1969).
40. Y. -C. Joo and C. V. Thompson : J. Appl. Phys., **82**, 6062 (1997).
41. A. S. Oates : Appl. Phys. Lett., **66**, 1475 (1995).
42. C. V. Thompson, and R. Carel : Mat. Sci. Eng. B, **32**, 211 (1995).
43. J. Zhang et al. : J. Materials Science Letters, **18**,

- 471 (1999).
44. A. Sekiguchi et al. : Material Research Society Symposium, spring, **L4.1** (2001).
  45. R. Spolenak et al. : Material Research Society Symposium, spring, **L6.8** (2001).
  46. P. R. Besser et al. : Mat. Res. Soc. Symp. Proc., **563**, 189 (1999).
  47. D. Winter and P. R. Besser, besser : Mat. Res. Soc. Symp. Proc., **563**, 201 (1999).
  48. S. P. Riege and C. V. Thompson : Scripta Materialia, **41**, 403 (1999).
  49. L. Vanasupa et al. : J. Appl. Phys., **85**, 2583 (1999).
  50. Cho and Thompson : Appl. Phys. Letts., **54**, 2577 (1989).
  51. W. W. Mullins : Acta Metall., **6**, 414 (1958).
  52. M. Morgen et al. : Annu. Rev. Mater. Sci., **20**, 645 (2000).
  53. W. W. Lee and P. S. Ho : MRS. Bull., **22**, 19 (1997).
  54. J. D. Eshelby : Proc. Roy. Soc., **A 241**, 376 (1957).
  55. S. P. Hau-Riege and C. V. Thompson : J. Materials Research, to be published.
  56. K. N. Lee et al : J. Appl. Phys., **78**, 4428 (1995).
  57. C.-K. Hu, et al. : Thin Solid Films, **262**, 84 (1995).
  58. C.-K. Hu, et al. : MRS Symp. Proc., **428** (1996).
  59. T. Surholt, et al. : Phys. Rev., **B50** (1994).
  60. D. B. Butrympwicz, et al. : J. Phys. Chems. Ref. Data, **2**, 643 (1977).

## 박영준



- 1986년 서울대학교 금속공학과 학사
  - 1988년 한국과학기술원 재료공학과 석사
  - 1988-91년 한국전자통신연구소 근무
  - 1995년 한국과학기술원 재료공학과 박사
  - 1995-96년 미국 MIT Postdoctoral associate
  - 1996년 현재 한국과학기술연구원 근무
- E-mail: yj-park@kist.re.kr